第39卷 第6期
2022年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

水资源“三条红线”约束下玛纳斯河灌区退耕土壤质量评价

黄 洲[1]， 杨 广[1]， 苏 军[2]， 李小龙[1]， 刘 兵[1]， 何新林[1]，
乔长录[1]， 李鹏飞[1]， 王春霞[1]， 赵 丽[1]

（1. 石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832000；
2. 第八师石河子市水利工程管理服务中心，新疆 石河子 832000）

摘 要：水资源“三条红线”约束促使以农业用水为主的区域逐步开展退地减水措施，有效地保证了用水总量控制指标，也产生部分土地退耕撂荒的土壤质量下降问题。本文以水资源“三条红线”约束下新疆玛纳斯河灌区退耕土壤为研究对象，分析对比了退耕地块（RF）和临近耕作地块（CK）土壤pH值、可溶性总盐（TDS）、有机质（OM）、全氮（TN）、全磷（TP）、碱解氮（AN）和速效钾（AK）7个土壤质量指标，通过构建模糊综合评价模型计算RF和CK土壤肥力指数，分析水资源“三条红线”约束下玛纳斯河灌区退耕土壤质量。结果表明：（1）退耕地块和临近耕作地块pH在7.18~8.78之间，总体上与土壤深度呈正相关。退耕地块含盐量整体比临近耕作地块高10.84%，盐分主要分布在40~100 cm。（2）退耕地块的土壤养分整体上低于临近耕作地块，其中碱解氮差异最大，低了22.15%。（3）退耕地块和临近耕作地块土壤肥力评价指数范围为0.49~0.77，土壤质量均在中等偏上，临近耕作地块比退耕地块肥力指数均值高6.67 %。研究结果可为灌区水资源总量约束下退地方案的实施及土壤质量保护提供理论依据。

关键词：退地减水；土壤质量；模糊综合评价；土壤肥力指数；玛纳斯河灌区

土壤质量综合反映了土壤物理、化学与生物特性，揭示了人类活动对土壤的影响与土壤动态变化[1]。开展土壤质量评价不仅能够揭示土壤质量状况与变化规律，而且可以为土地资源的科学利用和管理提供重要依据。土壤质量评价涉及诸多土壤因子，如何确定评价指标与方法成为土壤质量评价的关键[2]。

目前，国内外土壤质量评价多集中于土壤质量综合指数法、内梅罗综合指数法、最小数据集法、模糊综合评价法等。Mishra等[3]选择电导率、镁、磷等利用土壤质量综合指数法，分析了印度喜马拉雅地区人工林土壤质量；Vasu等[4]研究了土壤容重、孔隙、颜色等属性特征值，利用最小数据集法对印度西北海岸带不同土壤质量进行综合评价；Obade等[5]选择土壤pH、容重、孔隙度等，利用主成分分析法对美国俄亥俄州5个不同农田的土壤质量进行评价；赵敬坤等[6]选择pH和有机质等指标，利用模糊综合评价法对重庆花椒区进行评价；赵娜等[7]选取土壤容重、孔隙度、电导率、有机质、全氮、硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾对华北低丘山地退耕还林区的耕地、退耕刺槐林土壤质量进行评价与分级。学者们结合区域特征、气候差异及土地利用方式等采用了多种方法结合的评价方法。Rahmanipour等[8]选取有机质、电导率、镉、钴等物理化学评价指标，利用土壤质量综合质量指数法和内梅罗综合指数法对加兹温省的耕地土壤质量进行评价；姜艳等[9]以玛纳斯河流域棉田土壤为研究对象，选择土壤碱解氮、有机质、速效钾、速效磷、pH、盐分及镉、铬、铅、镍、铜、砷，采用因子分析法和土壤质量综合评价指数法对棉田土壤质量状况进行定量评价；周伟等[10]

收稿日期：2022-03-24； **修订日期：**2022-08-03
基金项目：兵团科技攻关计划项目（2021AB021）；国家自然科学基金（52269006）；兵团科技合作计划项目（2022BC001）；国家自然科学基金-新疆联合基金重点项目（U1803244）；石河子大学科学技术研究项目（CXRC201801，RCZK2018C22，RCZK202026）
作者简介：黄洲（1998-），男，硕士研究生，研究方向为水资源高效利用技术. E-mail: 1760544225@qq.com
通讯作者：杨广. E-mail: mikeyork@163.com

以长春城市森林绿地为研究对象，选取有机质、氮、磷等土壤肥力指标，利用GIS与内梅罗指数相结合的方法分析了长春城市森林绿地土壤养分空间分布特征；郑琦等[11]选取新疆主要棉区土壤pH、盐分、有机质、全氮、速效磷、速效钾及镉、铜、锌、砷、磷，采用模糊评价法与内梅罗指数法对棉田土壤质量进行综合评价。综上所述，土壤质量评价集中于农业耕地、林地、草地等尺度，对退耕撂荒地研究较少。

新疆玛纳斯河灌区位于天山北麓中段，属于干旱半干旱区，2020年玛纳斯河灌区农业用水为12.09×10⁸ m³，占总用水量的87%，农业用水量过大严重影响了区域水资源可持续发展。随着水资源“三条红线”的实施，到2030年灌区农业用水总量控制在9.01×10⁸ m³，减少了3.08×10⁸ m³，农业用水量缩减严重。为满足水资源“三条红线”的控制量，玛纳斯河灌区自2012年起实施退地减水措施，累计退耕土地2×10⁴ hm²，出现退耕土地撂荒问题，土壤质量局部下降。基于此，本文通过分析退耕地块和临近耕作地块土壤pH、可溶性总盐、有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效钾7个土壤质量指标，通过构建模糊综合评价模型计算退耕地块和临近耕作地块土壤肥力指数，分析水资源“三条红线”约束下，玛纳斯河灌区退耕土壤质量变化状况，为灌区水资源总量约束下退地方案的实施及土壤质量保护提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于新疆玛纳斯河灌区，地理坐标为84°98′~86°39′E，44.04′~45°19′N。土壤多为灰漠土、潮土、草甸土，土质多为砾质土、沙质土等。年降雨量在125~200 mm之间，年蒸发量在1700~2200 mm之间。水资源总量约为22.91×10⁸ m³，可用水资源量约为20.92×10⁸ m³，地下水资源总量约为11.97×10⁸ m³。灌区自2012年起实施退地减水措施，至今累计退耕土地2×10⁴ hm²，用水总量共减少2.14×10⁸ m³，后续还需退耕2.49×10⁴ hm²。

1.2　试验方案

采样时间为2021年4月中旬，采样点位于玛纳斯河灌区141团、142团、134团、150团和148团，设置2个处理：临近耕作地块（CK，均为棉田，灌溉方式为膜下滴灌）、退耕地块（RF，退耕2 a地块），2个处理分别设置6个采样点，共12个采样点，所选采样点均处于重点退耕区，采样点地理位置见图1。利用梅花采样法[12]将样地分为5个5 m×5 m的矩形地进行土壤剖面采样，每块矩形地设置5个采样点，利用土钻采集表层土、0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm深度土壤，5个矩形地取得

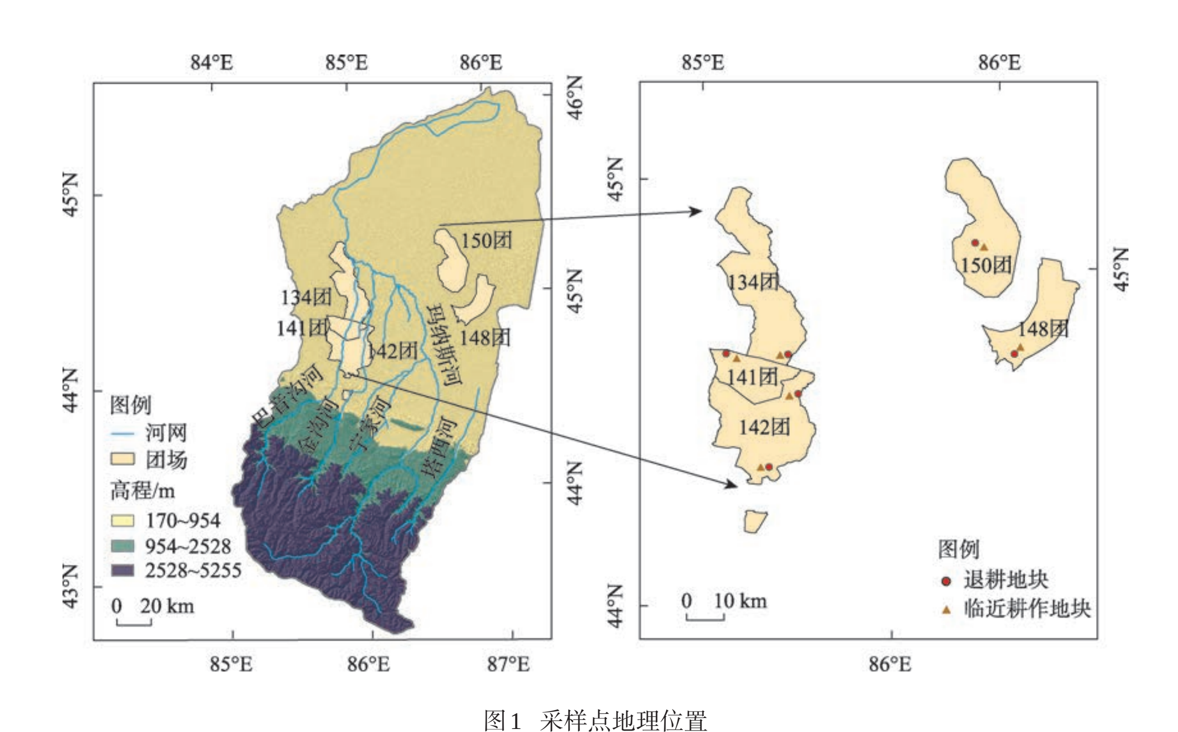


图1　采样点地理位置

Fig. 1　Geographical location map of sampling points

的各深度土壤分别进行混合，最后按照四分法[13]取土壤样品1 kg，共取84个样品，取样布局见图2。为避免土壤肥力受人为因素干扰，土壤样品采集于春耕前进行。

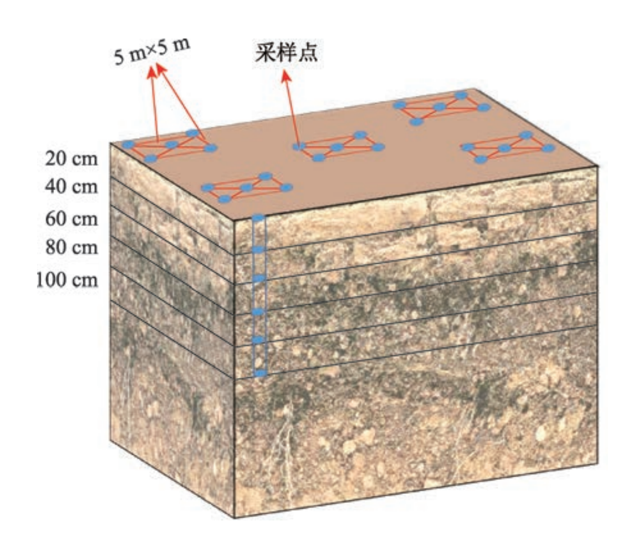


图2 取样布局示意图

Fig. 2 Sampling layout

土壤样品参照乔胜英[14]所采用方法对pH、可溶性总盐、有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效钾进行分析测定。其中pH采用1:1水土比酸度计法，可溶性总盐采用1:5土水比电导法，有机质采用重铬酸钾外加热法，全氮采用凯氏定氮法，全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法，碱解氮采用碱解扩散法，速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定。

1.3 土壤质量评价

利用模糊综合评价法对退耕地块及临近耕作地块的土壤质量进行评价，选取土壤pH、可溶性总盐、有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效钾7个肥力指标[9,15]，根据肥力指标与作物生长的关系分别采用抛物线型、S型函数、戒下型计算各养分指标的隶属度值。

有机质、碱解氮、速效钾、全氮、全磷含量5个指标属于S型隶属关系，其隶属度函数为：

$$f(x)=\begin{cases}0.1,\ x<x_1\\ \dfrac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1}+0.1,\ x_1\leqslant x<x_2\\ 1.0,\ x\geqslant x_2\end{cases} \tag{1}$$

土壤pH属于抛物线型隶属关系，其隶属度函数为：

$$f(x)=\begin{cases}0.1,\ x<x_1或x\geqslant x_4\\ \dfrac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1}+0.1,\ x_1\leqslant x<x_2\\ 1.0,\ x_2\leqslant x<x_3\\ \dfrac{0.9(x_4-x)}{x_4-x_3}+0.1,\ x_3\leqslant x<x_4\end{cases} \tag{2}$$

土壤可溶性总盐属于戒下型隶属关系，其隶属度函数为：

$$f(x)=\begin{cases}0.1,\ x<x_1\\ \dfrac{0.9(x_2-x)}{x_2-x_1}+0.1,\ x_1\leqslant x<x_2\\ 1.0,\ x\geqslant x_2\end{cases} \tag{3}$$

根据研究区土壤肥力特征，参考前人研究结果[16-18]，确定土壤各肥力指标在隶属度函数曲线转折点取值(表1、表2)。

利用相关系数法为各评价指标权重赋值，能客观地反应出各指标对土壤肥力影响程度。确定指标隶属度值和权重系数后，应用模糊综合评价法通过加权求和计算得出土壤肥力指数(IFI)。

表1 各评价指标隶属度函数曲线转折点取值

Tab. 1 Value of turning point of membership function curve of each evaluation index

转折点	含盐量/(g·kg^{-1})	碱解氮/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})	有机质/(g·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})
x_1	0.52	30	89.5	2.73	0.11	0.4
x_2	10.00	120	210.0	17.00	1.00	0.8

表2 pH隶属度函数曲线转折点取值

Tab. 2 Value of turning point of pH value membership function curve

转折点	x_1	x_2	x_3	x_4
	4	6.5	8	9

$$\mathrm{IFI}=\sum_{i=1}^{n} f_i\times w_i \tag{4}$$

式中：n为参评指标数量；f_i为第i个指标的隶属度；w_i为第i个指标的权重。IFI肥力指数取值范围为0~1，指数越大，土壤肥力水平越高。根据研究区土壤肥力指数进行分级，分为高(>0.8)、较高(0.6~0.8)、中(0.4~0.6)、较低(0.2~0.4)和低(<0.2)5个等级。

2 结果与分析

2.1 土壤肥力分析

由表3可知,RF处理pH范围为7.18~8.78,平均值为7.82;盐分范围为0.22~12.47 g·kg^{-1},均值为2.76 g·kg^{-1},整体上为中度盐化土,变异系数为107.01%,为强变异程度;碱解氮、有机质、全氮含量分别为37.07 mg·kg^{-1}、7.30 g·kg^{-1}、0.37 g·kg^{-1},总体含量较低;速效钾、全磷含量分别为262.53 mg·kg^{-1}、0.70 g·kg^{-1},含量较高。CK处理pH为7.86,盐分范围为0.48~7.97 g·kg^{-1},均值为2.49 g·kg^{-1};碱解氮、有机质、全氮含量分别为47.62 mg·kg^{-1}、7.80 g·kg^{-1}、0.47 g·kg^{-1},含量偏低;速效钾、全磷含量分别为243.16 mg·kg^{-1}、0.76 g·kg^{-1},含量较高;pH变异系数4.02%,为弱变异,其余指标变异程度在16.39%~73.06%之间,均呈中等变异强度,这些指标受外界影响较大。RF处理含盐量平均值、最大值和变异系数比CK处理提高了0.27 g·kg^{-1}、4.5 g·kg^{-1}、33.95%,速效钾提高了19.37 mg·kg^{-1};碱解氮、有机质、全氮和全磷平均值RF处理均低于CK处理,差值为10.55 mg·kg^{-1}、0.5 mg·kg^{-1}、0.1 g·kg^{-1}、0.06 g·kg^{-1},退耕后土壤肥力出现下降。

由图3可知,RF处理pH与土壤深度呈正相关,在80~100 cm时,pH变化较小,为7.95;CK处理pH沿剖面先减小后增大,表层土pH为7.70,0~20 cm处pH减小,为7.63,20~100 cm逐渐增加,在80~100 cm达到8.19。2个处理含盐量40 cm深度后发生变化,0~40 cm RF处理含盐量小于CK处理,40 cm RF处理与CK处理含盐量分别为2.71 g·kg^{-1}、2.88 g·kg^{-1},在40~100 cm则相反;RF处理盐分主要堆积在40~100 cm,最高时达到3.74 g·kg^{-1},CK处理盐分主要堆积在0~40 cm,最高达到3.25 g·kg^{-1}。碱解氮、全氮、全磷总体上随着土层深度增加而减少,到达100 cm深度时,变化率均减小,并且RF处理含量均低于CK处理,2个处理其表层含量分别为62.46 mg·kg^{-1}、0.60 g·kg^{-1}、0.79 g·kg^{-1},74.17 mg·kg^{-1}、0.76 g·kg^{-1}、0.86 g·kg^{-1}。2个处理均含有大量的速效钾,其含量与土壤深度呈负相关,在0~20 cm RF处理速效钾含量大于CK处理,20 cm以后则相反;在80~100 cm RF处理与CK处理含量分别为179.15 mg·kg^{-1} 、181.12 mg·kg^{-1}。2个处理有机质含量随深度的变化规律与速效钾一致,表层含量达最高,分别为11.82 g·kg^{-1}、10.26 g·kg^{-1}。

2.2 土壤肥力评价

表征土壤肥力指标间相关性分析结果如图4所示,能够反映出各指标间的相关性系数。通过计算得到肥力指标间相关系数绝对值之和的平均值,该平均值占所有肥力指标相关系数平均值总和的百分比即为该项肥力指标的权重系数。土壤各肥力指标的权重系数如表4所示,碱解氮、速效钾相关系数绝对值的平均值最大,为0.503、0.398,权重系数也最大,为0.274、0.217,说明碱解氮、速效钾对土壤

表3 土壤肥力指标的统计特征值

Tab. 3 Statistical characteristic values of soil nutrients

指标	土地状态	平均值	标准差	最小值	最大值	变异系数/%
pH	RF	7.82	0.44	7.18	8.78	5.58
	CK	7.86	0.32	7.23	8.63	4.02
含盐量/(g·kg^{-1})	RF	2.76	2.95	0.22	12.47	107.01
	CK	2.49	1.82	0.48	7.97	73.06
碱解氮/(mg·kg^{-1})	RF	37.07	22.42	8.80	65.03	60.47
	CK	47.62	29.48	7.5	90.67	61.9
速效钾/(mg·kg^{-1})	RF	262.53	143.13	69.17	607.70	54.52
	CK	243.16	90.88	93.57	556.2	37.37
有机质/(g·kg^{-1})	RF	7.30	3.84	1.29	19.44	52.61
	CK	7.80	3.40	2.47	14.93	43.63
全氮/(g·kg^{-1})	RF	0.37	0.21	0.01	0.98	56.55
	CK	0.47	0.22	0.09	0.98	47.83
全磷/(g·kg^{-1})	RF	0.70	0.15	0.40	0.97	21.58
	CK	0.76	0.12	0.38	0.97	16.39

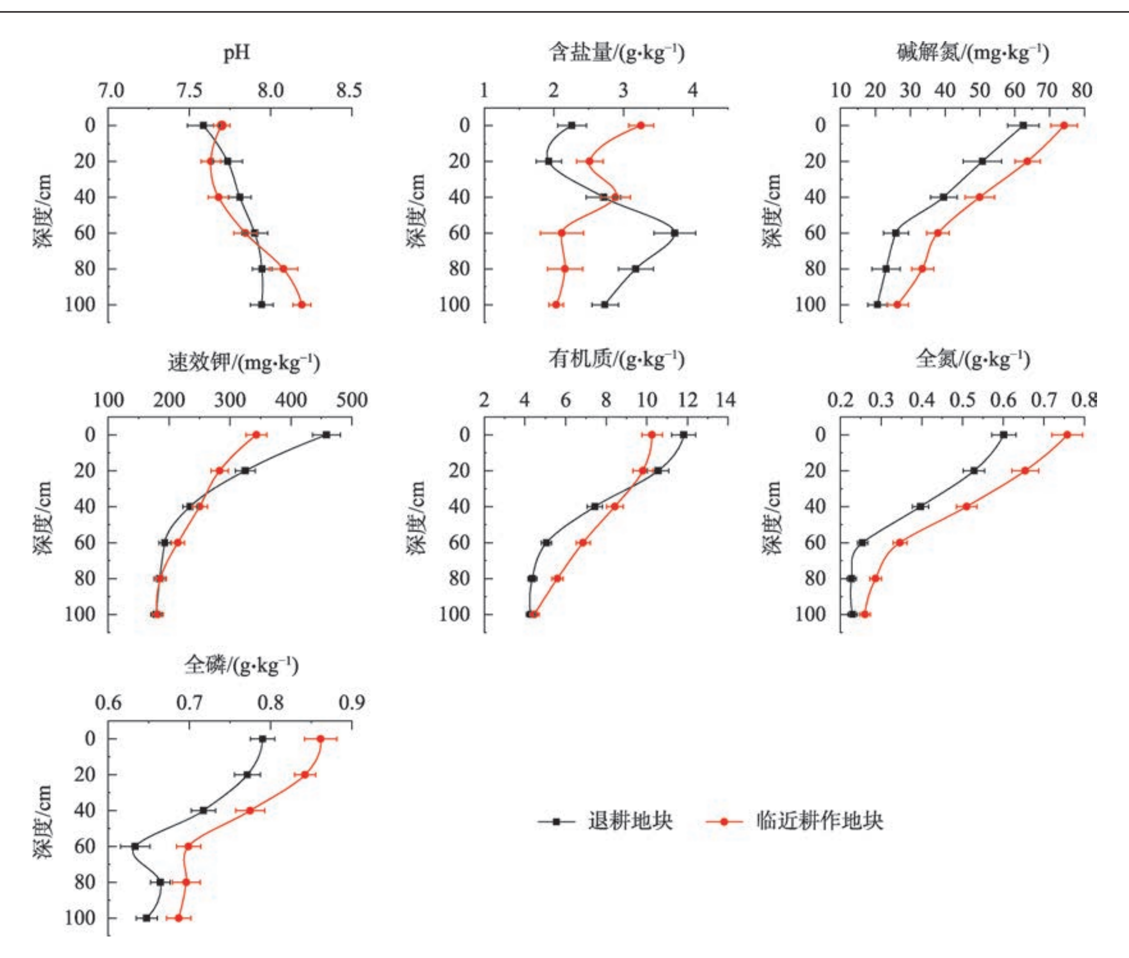


图3 土壤剖面各项养分指标垂直分布

Fig. 3 Distribution of nutrient content in soil profile



pH	*	*			*	*
−0.227	含盐量	*			*	*
−0.504	0.351	碱解氮	*	*	*	*
−0.0416	0.213	0.397	速效钾	*	*	*
−0.201	0.201	0.484	0.620	有机质	*	*
−0.348	0.366	0.716	0.601	0.789	全氮	*
−0.384	0.580	0.565	0.517	0.652	0.785	全磷

注: *表示在$P \leq 0.05$水平上显著。

图4 相关系数

Fig. 4 Correlation coefficient diagram

肥力影响最大;而有机质与全氮权重系数最低,分别为0.047、0.059,影响较小。

通过对2个处理的单项肥力指标的隶属度值分别求平均值,从而获得2个处理不同肥力指标的隶属度值如图5所示。由图5可知,RF处理与CK处理不同指标的隶属度值随深度的增加而降低,说明其土层越深,土壤肥力越弱。

土壤肥力指数如图6所示,RF处理土壤肥力指数变化范围为0.50~0.76,CK处理为0.49~0.77。由图6可知,2个处理土壤肥力指数和土壤深度均为负相关,RF处理在0~60 cm肥力指数减少了32.89%,在60~100 cm趋于稳定;CK处理在0~100 cm肥力指数减少明显,减少了36.36%。RF处理土壤肥力状

表4 各土壤肥力指标的相关系数平均值和权重系数

Tab. 4 Average value and weight coefficient of correlation coefficient of each soil fertility index

肥力指标	pH值	全盐量	碱解氮	速效钾	有机质	全氮	全磷
相关系数平均值	0.284	0.323	0.503	0.398	0.086	0.109	0.131
权重系数	0.155	0.176	0.274	0.217	0.047	0.059	0.072

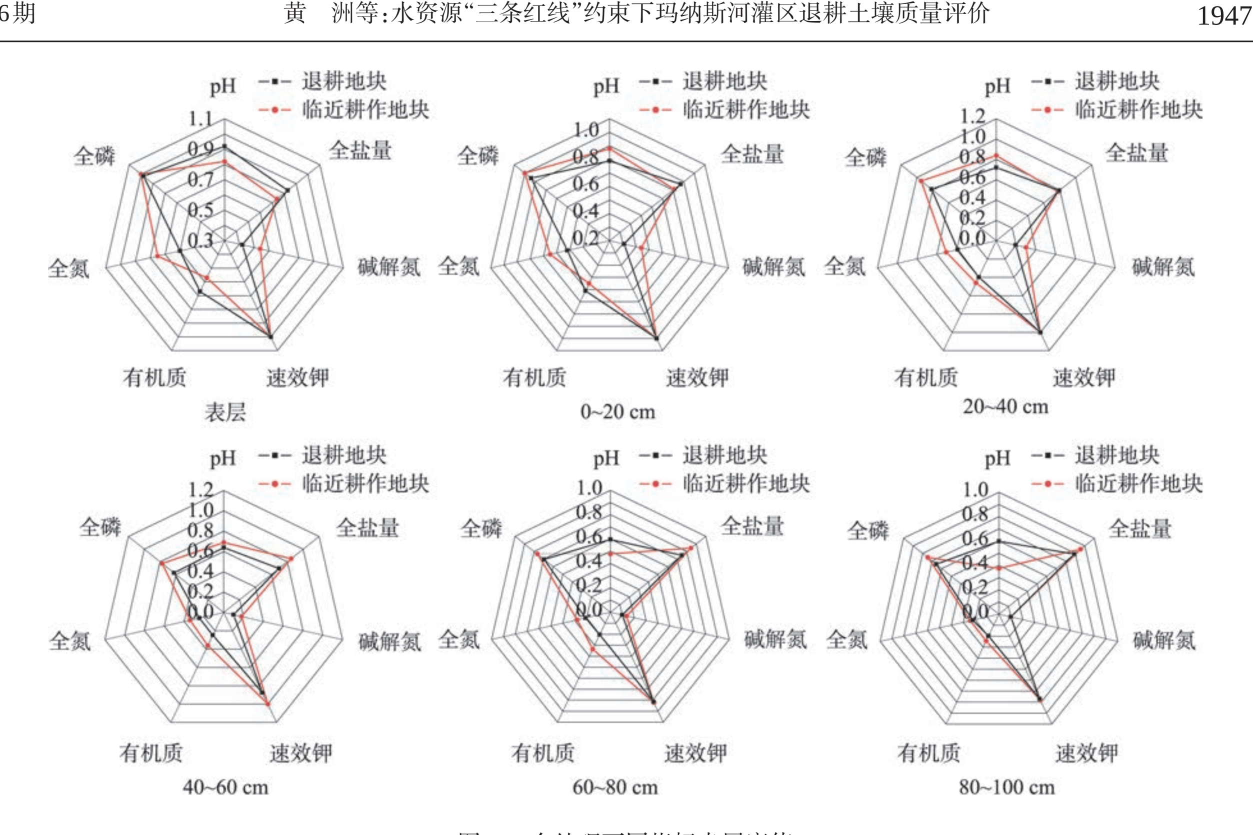


图5　2个处理不同指标隶属度值

Fig. 5　Membership values of different indexes of two kinds of cultivated land

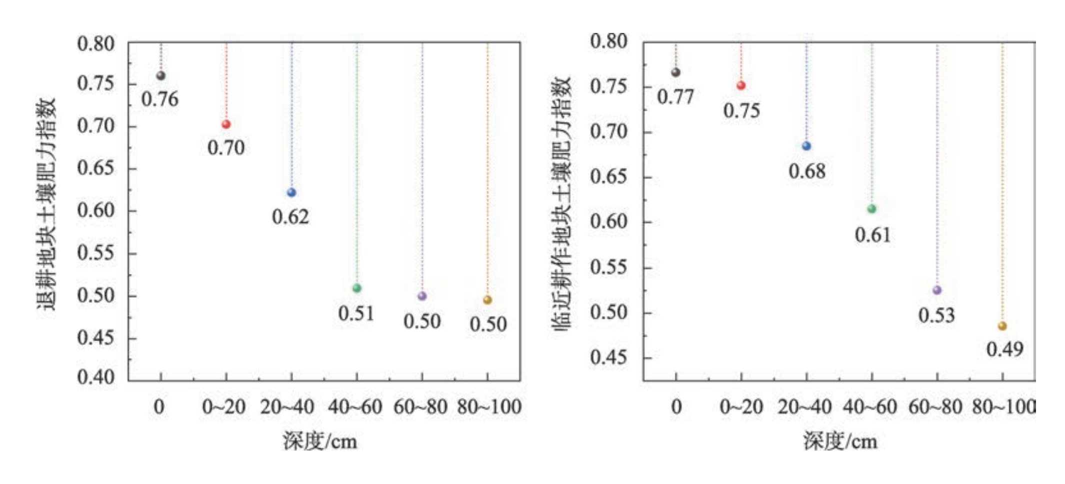


图6　土壤肥力指数

Fig. 6　Comprehensive fertility index of soil

况达到较高水平的有表层土、0~20 cm、20~40 cm深度,肥力指数分别为0.76、0.70、0.62;40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm深度肥力指数分别为0.51、0.50、0.50,肥力均为中等水平。CK处理表层土、0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm深度土壤肥力均达到了较高的水平,肥力指数分别为0.77、0.75、0.68、0.61,60~80 cm、80~100 cm深度肥力均达到了中等水平,土壤肥力指数分别为0.53、0.49,由此可知,CK处理0~100 cm土层土壤肥力均在中等偏上的水平,有利于农业耕作。RF处理在0~100 cm深度肥力水平均略低于CK处理,在20~60 cm深度土壤肥力指数差值达到最大,为0.11;20~40 cm深度RF处理为0.62,CK处理为0.68,土壤肥力属于较高水平;在40~60 cm土层,RF处理土壤肥力指数比CK处理低了0.1,肥力状况差异大。RF处理与CK处理肥力指数均值分别为0.60、0.64,相差0.04。根据模糊综合评价法分析结果显示,玛纳斯河灌区2个处理的肥力水平整体均处于中等偏上。

3 讨 论

3.1 土地退耕对土壤pH和含盐量的影响

本研究区灌溉用水含有大量的可溶性阳离子 Na^+、Mg^+、Ca^+、K^+，土壤胶体对碱性离子吸附达到一定饱和度后，会引起交换性阳离子的水解作用，在土壤中产生NaOH，使土壤成碱性[19]，且与深度呈正相关，这与王媛华等[20-21]研究结果一致。RF处理由于没有进行施肥与灌溉，土壤pH整体上与退耕前无明显变化，这与钱凤魁等[22]研究结果一致。RF处理和CK处理0~100 cm深度含盐量均值分别为2.76 $g\cdot kg^{-1}$、2.49 $g\cdot kg^{-1}$，RF处理的含盐量总体上高于CK处理，这是由于CK处理在耕种期间进行灌溉，根据"盐随水动"的原理，部分盐分被运移至深层土壤，0~100 cm盐分减少，RF处理由于土壤蒸发以及盐生植物的影响将盐分带到了表层，盐分在表层累积，这与冯小平等[23-24]的研究结果一致，灌区棉田进行膜下滴灌耕作有利于对土壤盐分的淋洗[25-26]，预防土壤盐渍退化。

3.2 土地退耕对土壤养分含量的影响

董利军等[27]研究表明，随着土地的退化，有机质在表层土壤中流失严重，而本研究结果显示，RF处理0~20 cm处有机质含量略高于CK处理，这是由于棉田耕深不超过20 cm，在土壤中形成了坚实的犁底层，制约了棉花根系纵向生长及吸收深层土壤水分和养分[28]，对有机质吸收主要集中在0~20 cm，并且在此深度棉花对有机质的吸收能力大于RF处理的盐爪爪、盐穗木[29]；而80 cm以下的深层土壤受土地利用方式影响减弱，RF处理与CK处理有机质含量相差不大，并且变化规律一致，这与王舒等[30]研究结果一致。全氮、碱解氮在0~100 cm土层均出现CK处理土壤含量高于RF处理，这是由于CK处理正常耕作期施加氮肥，导致氮素总体含量与向下发生运移的含量均高于RF处理[31-32]。在0~100 cm土层RF处理全磷含量均低于CK处理，这是由于CK处理在耕作时段有磷肥施用，并且磷在土壤中的移动性较差，固定率可达70%以上，向下发生运移较慢[33]。2个处理速效钾含量较高，在0~60 cm深度变化率较大，在60 cm深度则趋于稳定，这是由于棉花及盐生植物盐爪爪、盐穗木的根系对速效钾的吸收主要集中在0~60 cm土层[34-35]。2个处理的肥力指数在40~60 cm深度达到最大，为0.1，原因是土壤养分含量在垂直方向递减[36]，CK处理受灌溉与施肥影响，部分可溶性养分随水运移至深层土壤，在深层土壤形成累积[37]；RF处理无养分补充，盐爪爪、盐穗木对养分进行消耗，深层土壤退化严重。

4 结 论

（1）退耕地块和临近耕作地块pH在7.18~8.78之间，二者无明显差异，总体上与土壤深度呈正相关；变异系数分别为5.58%、4.02%，为弱变异，土地利用方式的改变对pH影响较小。退耕地块含盐量整体比临近耕作地块高10.84%，盐分主要分布在40~100 cm。

（2）退耕地块和临近耕作地块土壤养分均在垂直方向具有"表聚"现象，不同深度养分元素含量变幅较大。退耕地块速效钾含量整体上比临近耕作地块高了7.97%，其余养分指标均低于临近耕作地块。

（3）退耕地块和临近耕作地块土壤质量均在中等偏上，临近耕作地块土壤肥力指数高于退耕地块。

参考文献（References）：

[1] 赵冰琴, 夏栋, 夏露, 等. 向家坝工程扰动区植被恢复土壤质量评价[J]. 中国环境科学, 2020, 40(3): 1224−1234. [Zhao Bingqin, Xia Dong, Xia Lu, et al. Assessment of vegetation restoration soil quality in disturbed area in Xiangjiaba hydropower project[J]. China Environmental Science, 2020, 40(3): 1224−1234.]

[2] 王雪梅, 柴仲平, 毛东雷, 等. 不同土地利用方式下渭−库绿洲土壤质量评价[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4): 319−323. [Wang Xuemei, Chai Zhongping, Mao Donglei, et al. Evaluation of quality in Weigan-Kuqa River delta oasis under different land use patterns [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(4): 319−323.]

[3] Mishra G, Marzaioli R, Giri K, et al. Soil quality assessment across different stands in tropical moist deciduous forests of Nagaland, India[J]. Journal of Forestry Research, 2019, 30(4): 1479−1485.

[4] Vasu D, Tiwari G, Sahoo S, et al. A minimum data set of soil morphological properties for quantifying soil quality in coastal agroecosystems[J]. Catena, 2021, 198: 105042.

[5] Obade V P, Lal R. Soil quality evaluation under different land management practices[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72 (11): 4531−4549.

[6] 赵敬坤, 陈松柏, 李忠意, 等. 模糊综合评价法判断重庆花椒种

植区土壤肥力水平[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(10): 206−212. [Zhao Jingkun, Chen Songbai, Li Zhongyi, et al. Soil fertility characteristics in Zanthoxylum bungeanum planting area of Chongqing with the analysis of fuzzy synthetic evaluation[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(10): 206−212.]

[7] 赵娜, 孟平, 张劲松, 等. 华北低丘山地不同退耕年限刺槐人工林土壤质量评价[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 351−358. [Zhao Na, Meng Ping, Zhang Jinsong, et al. Soil quality assessment of *Robinia psedudoacia* plantations with various ages in the Grain-for-Green Program in hilly area of North China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 351−358.]

[8] Rahmanipour F, Marzaioli R, Bahrami H A, et al. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran[J]. Ecological Indicators, 2014, 40(5): 19−26.

[9] 姜艳, 刘东阳, 李健梅, 等. 玛河流域不同连作年限棉田土壤质量分析及综合评价[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(4): 186−193. [Jiang Yan, Liu Dongyang, Li Jianmei, et al. Soil quality assessment of continuous cropping cotton fields for different years in Manas River Basin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(4): 186−193.]

[10] 周伟, 王文杰, 张波, 等. 长春城市森林绿地土壤肥力评价[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1211−1220. [Zhou Wei, Wang Wenjie, Zhang Bo, et al. Soil fertility evaluation for urban forests and green spaces in Changchun City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4): 1211−1220.]

[11] 郑琦, 王海江, 吕新, 等. 新疆棉田土壤质量综合评价方法[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1291−1301. [Zheng Qi, Wang Haijiang, Lv Xin, et al. Comprehensive method for evaluating soil quality in cotton fields in Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(4): 1291−1301.]

[12] 张庆辉, 王贵, 朱晋, 等. 包头南郊污灌区农田表层土壤重金属潜在生态风险综合评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(7): 181−186, 192. [Zhang Qinghui, Wang Gui, Zhu Jin, et al. Comprehensive evaluation of potential ecological risk of heavy metals in the surface soil of the farmland in wastewater irrigation area of southern suburbs in Baotou[J]. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2012, 40(7): 181−186, 192.]

[13] 李小平, 张蒙, 周骞, 等. 乌鲁木齐城市土壤与灰尘粒径空间分布特征[J]. 中国环境监测, 2019, 35(1): 37−43. [Li Xiaoping, Zhang Meng, Zhou Qian, et al. Spatial distribution of particle size of urban soil and dust in Urumqi[J]. Environmental Monitoring in China, 2019, 35(1): 37−43.]

[14] 乔胜英. 土壤理化性质实验指导书[M]. 武汉: 中国地质大学出版社有限责任公司, 2012: 54−75. [Qiao Shengying. Turang Lihua Xingzhi Shiyan Zhidaoshu[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press Co, Ltd, 2012: 54−75.]

[15] 吴科生, 车宗贤, 包兴国, 等. 河西绿洲灌区灌漠土长期秸秆还田土壤肥力和作物产量特征分析[J]. 草业学报, 2021, 30(12): 59−70. [Wu Kesheng, Che Zongxian, Bao Xingguo, et al. Analysis of soil fertility and crop yield characteristics following long-term straw return to the field in a Hexi Oasis irrigated area[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(12): 59−70.]

[16] 乔俊, 任惠雯, 费鹏, 等. 山西河津黄河盐碱滩土壤肥力评价[J]. 北方园艺, 2021(16): 102−107. [Qiao Jun, Ren Huiwen, Fei Peng, et al. Evaluation on soil fertility of yellow river saline alkali flat in Hejin Rwgion of Shanxi[J]. Northern Horticulture, 2021(16): 102−107.]

[17] 林圣玉, 李英, 张华明, 等. 鄱阳湖区坡耕地土壤肥力质量评价[J]. 中国水土保持, 2018(11): 60−63, 67. [Lin Shengyu, Li Ying, Zhang Huaming, et al. Assessment on soil fertility quality of slope farmland in Poyang Lake Area[J]. Soil and Water Conservation in China, 2018(11): 60−63, 67.]

[18] 李颖慧, 姜小三, 王振华, 等. 基于土壤肥力和重金属污染风险的农用地土壤质量综合评价研究——以山东省博兴县为例[J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1052−1062. [Li Yinghui, Jiang Xiaosan, Wang Zhenhua, et al. Comprehensive evaluation of soil quality of agricultural land based on soil fertility and heavy metal pollution risk: A case study of Boxing County, Shandong Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(5): 1052−1062.]

[19] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 235−237. [Li Fahu. Physical Chemistry of Soil[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 235−237.]

[20] 王媛华, 段增强, 汤英, 等. 碱性大棚土壤剖面pH值与盐分的相关性[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(5): 537−540. [Wang Yuanhua, Duan Zengqiang, Tang Ying, et al. Correlation between pH value and salinity of soil profile in alkaline greenhouse[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(5): 537−540.]

[21] 张茹, 李建平, 张翼, 等. 封育对黄土高原草地深层土壤pH的影响[J]. 生态科学, 2020, 39(1): 72−77. [Zhang Ru, Li Jianping, Zhang Yi, et al. Effects of fencing on soil pH in deep Loess Plateau grassland[J]. Ecological Science, 2020, 39(1): 72−77.]

[22] 钱凤魁, 周阳, 李婉宁, 等. 辽河口翅碱蓬湿地退化区土壤理化性质及生态阈值分析[J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1085−1094. [Qian Fengkui, Zhou Yang, Li Wanning, et al. Soil characteristics in wetland degradation areas and soil threshold calculation for *Suaeda salsa* growth in Liaohe Estuary Wetland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(5): 1085−1094.]

[23] 冯小平, 王义东, 郭长城, 等. 长期垦殖与退化对七里海芦苇沼泽土壤盐分的影响[J]. 湿地科学, 2014, 12(3): 388−394. [Feng Xiaoping, Wang Yidong, Guo Changcheng, et al. Effects of long-term reclamation and degradation on soil salinity of *Phragmites australis* marshes in Qilihai Wetlands[J]. Wetland Science, 2014, 12(3): 388−394.]

[24] 谭明东, 王振华, 王越, 等. 长期滴灌棉田非灌溉季节土壤盐分累积特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 485−492. [Tan Mingdong, Wang Zhenhua, Wang Yue, et al. Soil salt accumulation

characteristics of long-term drip irrigation in cotton fields during non-irrigation seasons[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 485–492.]

[25] 李万精, 杨广, 雷杰, 等. 不同矿化度(微)咸水膜下滴灌棉田土壤水盐分布及棉花生长特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(3): 95–103. [Li Wanjing, Yang Guang, Lei Jie, et al. Soil water and salt distribution and cotton growth under film drip irrigation with different water salinity in cotton field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(3): 95–103.]

[26] 马波, 周青云, 张宝忠, 等. 基于HYDRUS-2D的滨海地区膜下滴灌土壤水盐运移模拟研究[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 182–191. [Ma Bo, Zhou Qingyun, Zhang Baozhong, et al. Simulation of soil water and salt transport under mulched drip irrigation based on HYDRUS model in coastal area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 182–191.]

[27] 董利军, 李金花, 陈珊, 等. 若尔盖湿地高寒草甸退化过程中土壤有机碳含量变化及成因分析[J]. 植物生态学报, 2021, 45(5): 507–515. [Dong Lijun, Li Jinhua, Chen Shan, et al. Changes in soil organic carbon content and their causes during the degradation of alpine meadows in Zoigê Wetland[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(5): 507–515.]

[28] 崔建平, 田立文, 郭仁松, 等. 深翻耕作对连作滴灌棉田土壤含水率及含盐量影响的研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(12): 134–139. [Cui Jianping, Tian Liwen, Guo Rensong, et al. Effect of deep tilling on soil moisture content and salinity content of drip irrigation cotton continuous cropping[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(12): 134–139.]

[29] 何洪盛, 田青, 王理德, 等. 青土湖退耕地植被群落特征与土壤理化性质分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 223–232. [He Hongsheng, Tian Qing, Wang Lide, et al. Study on vegetation community characteristics and soil physical and chemical properties of abandoned land in Qingtu Lake[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 223–232.]

[30] 王舒, 马岚, 高甲荣, 等. 晋西黄土区土地利用方式对土层有机质变异的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2016, 40(5): 81–86. [Wang Shu, Ma Lan, Gao Jiarong, et al. Effect of land use type on variability of soil organic matter content with soil depth in the loess region of western Shanxi Province[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2016, 40(5): 81–86.]

[31] 安慧, 杨新国, 刘秉儒, 等. 荒漠草原区弃耕地植被演替过程中植物群落生物量及土壤养分变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3145–3149. [An Hui, Yang Xinguo, Liu Bingru, et al. Changes of plant community biomass and soil nutrients during the vegetation succession on abandoned cultivated land in desert steppe region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3145–3149.]

[32] 秦宇坤, 李鹏程, 郑苍松, 等. 施氮量对低肥力棉田土壤氮素及棉花养分吸收利用影响[J]. 棉花学报, 2019, 31(3): 242–253. [Qin Yukun, Li Pengcheng, Zheng Cangsong, et al. Effects of nitrogen application rates on soil nitrogen content, nutrient uptake and utilization of cotton in low fertility fields[J]. Cotton Science, 2019, 31(3): 242–253.]

[33] 张田, 许浩, 茹淑华, 等. 不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5247–5255. [Zhang Tian, Xu Hao, Ru Shuhua, et al. Distribution of phosphorus in soil profiles after continuous application of different fertilizers[J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 5247–5255.]

[34] 杨昊天, 李新荣, 刘立超, 等. 荒漠草地4种灌木生物量分配特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1340–1348. [Yang Haotian, Li Xinrong, Liu Lichao, et al. Biomass allocation patterns of four shrubs in desert grassland[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(5): 1340–1348.]

[35] 郝帅, 李发东. 艾比湖流域典型荒漠植被水分利用来源研究[J]. 地理学报, 2021, 76(7): 1649–1661. [Hao Shuai, Li Fadong. Water sources of the typical desert vegetation in Ebinur Lake basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(7): 1649–1661.]

[36] 穆叶赛尔·吐地, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清. 天山北坡林沿土壤养分含量的区域差异特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 580–589. [Muyessar Tudi, Jilili Abuduwaili, Jiang Fengqing. Regional differences in soil nutrient content along the forest edge in the northern slope of Tianshan Mountains[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(5): 580–589.]

[37] 谭军利, 王林权, 李生秀. 不同灌溉模式下水分养分的运移及其利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2005(4): 442–448. [Tan Junli, Wang Linquan, Li Shengxiu. Movement and utilization of water nutrient under different irrigation patterns[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2005(4): 442–448.]

Soil quality evaluation of returning farmland to Manas River irrigation area under the constraints of the "Three Red Lines" strategy of water resources

HUANG Zhou[1], YANG Guang[1], SU Jun[2], LI Xiaolong[1], LIU Bing[1], HE Xinlin[1], QIAO Changlu[1], LI Pengfei[1], WANG Chunxia[1], ZHAO Li[1]

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. Water Conservancy Project Management and Service Center of the Eighth Division Shihezi City, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: The restriction of the "Three Red Lines" strategy of water resources makes the areas dominated by agricultural water gradually conduct "reducing water consumption by returning farmland" measures, which effectively ensures a control index of total water consumption and produces the decline of soil quality of abandoning some land after returning farmland. Taking the returning farmland soil in the Manas River irrigation area in Xinjiang as the research object under the condition of "three red lines," this paper analyzes the indexes of soil pH value, total dissolved salt, organic matter, total nitrogen, total phosphorus, alkali hydrolyzed nitrogen (AN), and available potassium (AK), and calculates the soil fertility index of returning farmland (RF) and adjacent cultivated plots (CK) by constructing a fuzzy comprehensive evaluation model, and to perform the soil quality evaluation of RF to Manas River irrigation area under the conditions of the "Three Red Lines" strategy. The results show that: (1) The salt content of treatment RF is 10.84% higher than that of CK. Both treatments are moderately saline soil. The salt of treatment RF is mainly accumulated at 40–100 cm. (2) The soil nutrients of RF treatment were lower than CK treatment as a whole, and the difference in alkali hydro nitrogen was the largest, 22.15% lower. (3) The soil fertility evaluation index of the two treatments ranged from 0.49 to 0.77, and the soil quality was above the middle level. The average fertility index of the CK treatment was 6.67% higher than that of the RF treatment. The research results can provide a basis for implementing the land withdrawal scheme under the constraint of the total amount of water resources in the irrigation area and the protection of soil quality.

Keywords: reducing water consumption by returning farmland; soil quality; fuzzy comprehensive evaluation method; soil fertility index; Manas River irrigation area